

## КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ ВИРТУАЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРИИ ИСПЫТАНИЙ ГТД

© 2011 В. Н. Рыбаков, В. С. Кузьмичев, А. Ю. Ткаченко

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

Описана концепция построения виртуальной лаборатории испытаний ГТД. Виртуальная лаборатория испытаний ГТД является составной частью его виртуальной модели и позволяет имитировать испытания по определению основных эксплуатационных характеристик.

*Лаборатория виртуальная, структура, алгоритм, имитация испытаний, модель математическая.*

Метод имитационного моделирования может рассматриваться как своеобразный экспериментальный метод исследования. От обычных прямых экспериментальных методов он отличается тем, что испытанию подвергается не сам объект, а реализованная на ЭВМ его имитационная модель.

При разработке авиационного двигателя одним из приоритетных направлений является создание виртуальной модели ГТД, которая охватывает весь его жизненный цикл. Из-за невозможности получения полностью адекватных моделей авиационных ГТД большая часть всех возникающих проблем решаются при помощи испытаний, которые проводятся на различных этапах жизненного цикла. Виртуальная лаборатория испытаний ГТД предназначена для имитации испытаний двигателя по определению основных эксплуатационных характеристик двигателей (дрессельных, скоростных, высотных и климатических) и является составной частью его виртуальной модели.

Проведение физических экспериментов по испытаниям авиационных ГТД – трудоёмкий и дорогостоящий процесс, что значительно снижает количество проводимых испытаний. В связи с этим целесообразно сочетать натурные испытания ГТД с имитацией их испытаний на ЭВМ. Это позволит сократить объём испытаний, затраты на эксплуатацию стенда, а в процессе обучения существенно расширить количество потенциальных лабораторных работ и таким образом повысить качество подготовки специалистов.

В состав виртуальной лаборатории входят следующие основные компоненты

(рис.1): подсистема математического моделирования ГТД АСТРА; подсистема планирования эксперимента; подсистема имитации погрешностей измерений; подсистема идентификации математической модели; подсистема документирования; подсистема визуализации процесса испытаний; информационная подсистема.



Рис. 1. Структура виртуальной лаборатории

Основу виртуальной лаборатории испытаний ГТД составляет автоматизированная САЕ-система АСТРА, разработанная в СГАУ. С её помощью реализованы модели 16 типов и схем ГТД:

- одновальный ТРД;
- двухвальный ТРД;
- одновальный ТРДФ;
- двухвальный ТРДФ;
- двухвальный ТРДД;
- трехвальный ТРДД;
- двухвальный ТРДДсм;
- трехвальный ТРДДсм;
- двухвальный ТРДДФсм;
- трехвальный ТРДДФсм;
- одновальный ТВД;
- двухвальный ТВД;
- двухвальный ТВД с однокаскадным компрессором и свободной турбиной;

- трехвальный ТВД с двухкаскадным компрессором и свободной турбиной;
- двухвальный ТВаД с однокаскадным компрессором и свободной турбиной;
- трехвальный ТВаД с двухкаскадным компрессором и свободной турбиной.

Подробно система АСТРА описана в работе [1].

Подсистема планирования эксперимента предназначена для проведения виртуального эксперимента по нескольким планам: полный факторный эксперимент, дробный факторный эксперимент, центральное композиционное планирование эксперимента (ортогональное и ротатабельное).

Например, при проведении эксперимента по получению высотно-скоростных характеристик применяют ротатабельный центрально-композиционный план 2-го порядка, включающий 15 опытов при различных сочетаниях факторов высоты  $H$ , скорости полета  $M$  и частоты вращения ротора  $n$ . Это позволяет уменьшить объем испытаний примерно в 3 раза [2].

Подсистема имитации измерений позволяет вносить в расчетные величины случайную погрешность измерения  $\delta$  и отклонение параметров испытываемого двигателя от проектных значений  $\Delta$ , имитирующее индивидуальные особенности каждого конкретного экземпляра двигателя, которые возникают при его изготовлении (например, погрешности изготовления лопаток, сборки ротора, камеры сгорания и т.п.).

Схема моделирования погрешности измерений и отклонений представлена на рис. 2.



Рис. 2. Схема имитации погрешностей измерений и отклонений

Для получения значений параметров серии измерений реализуется цикл, на каждом этапе которого определяется новое значение случайной погрешности  $\delta$ .

Подсистема идентификации математической модели. В настоящее время в

практике создания двигателя чаще всего используются математические модели первого уровня. Это система нелинейных уравнений, описывающая рабочий процесс и совместную работу узлов двигателя и связывающая параметры двигателя  $P$  с параметрами его узлов  $Q$  и входными воздействиями  $X$  (внешними условиями и режимом работы):

$$P = f(Q, X).$$

Идентификация такой математической модели заключается в уточнении оценок параметров узлов  $Q$  по значениям параметров двигателя  $P$ , определенным в результате испытаний. При испытаниях двигателя количество ( $M$ ) неизвестных параметров  $Q$  намного больше, чем измеренных параметров двигателя  $P$ .

Измеренное значение параметра  $P_i^{\text{изм}}$  отличается от значения параметра, полученного при расчете по математической модели  $P_i$  на величину  $\delta_i$  с учетом имитации конкретного экземпляра двигателя:

$$P_i - P_i^{\text{изм}} = \delta_{P_i}, \text{ где } P_i = P_i^{\text{расч}} + \Delta_i.$$

Если при испытании двигателя определяется  $N$  параметров, то можно составить систему нелинейных уравнений, состоящую из  $N$  уравнений:

$$\begin{cases} P_i - P_i^{\text{изм}} = \delta_{P_i} \\ P_{i+1} - P_{i+1}^{\text{изм}} = \delta_{P_{i+1}} \\ \dots \\ P_N - P_N^{\text{изм}} = \delta_{P_N} \end{cases} \quad (1)$$

Так как неизвестных величин  $Q$  больше, чем уравнений в системе, то эта система является незамкнутой.

Для решения системы уравнений  $L$  неизвестными параметрами узлов необходимо задаться:

$$L = M - N,$$

где  $M$  - общее количество неизвестных параметров узлов.

Для уменьшения количества неизвестных параметров  $L$  система уравнений дополняется аналогичными уравнениями, но для всей совокупности режимов работы двигателя или внешних условий, например  $H_{\text{пр}}$ ,  $V_{\text{пр}}$  (см. систему уравнений (2)). Часть параметров, например КПД компрессоров

$\eta_{ki}$ , определяются характеристикой узла и совместной работой узлов:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{i,j} - P_{i,j}^{ИЭМ} = \delta_{P_{i,j}} \\ P_{i+1,j} - P_{i+1,j}^{ИЭМ} = \delta_{P_{i+1,j}} \\ \vdots \\ P_{N,j} - P_{N,j}^{ИЭМ} = \delta_{P_{N,j}} \\ P_{i,j+1} - P_{i,j+1}^{ИЭМ} = \delta_{P_{i,j+1}} \\ P_{i+1,j+1} - P_{i+1,j+1}^{ИЭМ} = \delta_{P_{i+1,j+1}} \\ \vdots \\ P_{N,j+1} - P_{N,j+1}^{ИЭМ} = \delta_{P_{N,j+1}} \\ \vdots \\ P_{i,k} - P_{i,k}^{ИЭМ} = \delta_{P_{i,k}} \\ P_{i+1,k} - P_{i+1,k}^{ИЭМ} = \delta_{P_{i+1,k}} \\ \vdots \\ P_{N,k} - P_{N,k}^{ИЭМ} = \delta_{P_{N,k}}, \end{array} \right. \quad (2)$$

где  $i = \overline{1, N}$  - количество измеряемых параметров на  $j$ -том режиме работы двигателя,  $j = \overline{1, k}$  - количество режимов работы двигателя.

Для определения наиболее значимых параметров, которыми следует задаться, рассчитываются значения коэффициентов влияния каждого параметра  $\delta P_j / \delta Q_i$ .

Из всех неизвестных параметров узлов двигателя  $Q$  выбираются параметры с наибольшим значением коэффициента влияния  $\delta P_j / \delta Q_i$  в количестве, равном количеству уравнений системы (2). Значения оставшихся неизвестных параметров задаются на основе статистических или экспериментальных данных, которые содержатся в базе данных. Таким образом, система уравнений (2) становится замкнутой – количество уравнений равняется числу неизвестных.

После решения системы уравнений (2) проводится проверка ограничений полученных значений параметров узлов  $Q$ . Если значение параметра выходит за допустимые пределы, то для данного параметра оно принимается равным его значению на границе предела, и этот параметр исключается из

числа искомых. В число искомых параметров включается параметр, коэффициент влияния которого следующий по убыванию, и система уравнений снова становится замкнутой.

Далее находится её решение и проводится проверка ограничений на значения найденных параметров. Итерационный процесс решения системы нелинейных уравнений (2) проходит до тех пор, пока все найденные значения параметров узлов не будут лежать в заданном диапазоне.

В результате формируется математическая модель исследуемого экземпляра двигателя, согласованная с экспериментальными данными.

Схема алгоритма идентификации математической модели представлена на рис. 3.

Подсистема документирования предназначена для формирования протоколов испытаний и построения характеристик двигателя.



Рис. 3. Структура информационной подсистемы виртуальной лаборатории испытаний ГТД

Подсистема визуализации процесса испытаний обеспечивает мультимедийную (графическую и звуковую) имитацию

испытаний - шум двигателя, имитацию движения рабочего тела по проточной части двигателя, графическое отображение измеряемых параметров и т.д.

Информационное обеспечение виртуальной лаборатории испытаний ГТД представляет собой совокупность баз данных: база данных (БД) математических моделей ГТД; БД исходных данных и БД результатов испытаний (рис. 4).

База данных математических моделей является составной частью подсистемы математического моделирования ГТД АСТРА, в которой хранится информация о математических моделях двигателей. Эти модели позволяют проводить проектный расчет двигателя и расчет его эксплуатационных характеристик.



Рис. 4. Структура информационной подсистемы виртуальной лаборатории испытаний ГТД

База исходных данных предназначена для записи, хранения и редактирования информации о ГТД. Помимо информации о двигателе в каждой записи хранятся исходные данные для расчета по математической модели двигателя.

В частности, по каждому двигателю содержится следующая информация:

- страна-разработчик;
- фирма-разработчик;
- название модели двигателя;
- тип двигателя;
- схема двигателя;
- год сертификации;
- основные данные двигателя;
- основные узлы двигателя;
- основные данные узлов двигателя;
- источник информации;
- примечание (дополнительная информация).

База исходных данных позволяет:

- просматривать, редактировать, добавлять записи (в зависимости от прав пользователя);
- производить выборку ГТД по значению (диапазону значений) любого поля;

- производить сортировку выбранных двигателей по любому полю;

- группировать двигатели по значению любого поля;

- передавать данные выбранного двигателя в Excel;

- строить графические зависимости параметров ГТД в координатной плоскости двух выбранных параметров.

База данных результатов испытаний обеспечивает запись, хранение и просмотр информации о проведенных ранее испытаниях: план эксперимента; отклонение параметров двигателя от проектного значения; протокол испытаний и др.

Информационная подсистема предназначена для хранения исходных данных и результатов экспериментов в виде базы данных. Это позволяет использовать исходные данные и результаты проведенного ранее эксперимента или же провести эксперимент заново по уже использованной ранее модели ГТД.

На рис. 5 представлена схема алгоритма работы виртуальной лаборатории ГТД.



Рис. 5. Схема алгоритма работы виртуальной лаборатории испытаний ГТД

После выбора типа и схемы двигателя из базы исходных данных исходные данные передаются в подсистему АСТРА, где совместно с математической моделью они составляют виртуальную модель двигателя. В зависимости от вида исходных данных (для проектного расчёта или расчёта выполненного двигателя) выбирается соответствующая математическая модель.

Если в базе исходных данных содержатся данные для расчёта выполненного двигателя, в подсистеме АСТРА выбирается задача испытаний, проводится расчёт характеристик (расчёт выполненного двигателя), виртуальный эксперимент и идентификация математической модели.

Если в базе исходных данных содержатся данные только для проектного расчёта, то проводится проектный расчёт, результатом которого являются данные для расчёта выполненного двигателя. Эти данные записываются в базу исходных данных и будут использованы при

дальнейшем проведении виртуального испытания этого двигателя.

После проведения виртуального эксперимента формируется протокол испытаний, который записывается в БД результатов испытаний. На основе её данных строятся различные графические зависимости.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки) на основании Постановления Правительства РФ №218 от 09.04.2010.

#### **Библиографический список**

1. Автоматизированная система термодинамического расчета и анализа (АСТРА) газотурбинных двигателей [Текст] / И.Н. Крупенич, В.С. Кузьмичев, В.В. Кулагин [и др.] // Вестн. Самар. гос. аэрокосм. ун-та. – 2006. – №2(10). – Ч.2. – С. 66-73.

2. Испытания авиационных двигателей [Текст]: учебник для вузов / под общ. ред. В.А. Григорьева и А.С. Гишварова. – М.: Машиностроение, 2009. – 504с.

## **CONCEPT OF CONSTRUCTION OF VIRTUAL LAB FOR GAS TURBINE ENGINE TESTING**

© 2011 V. N. Rybakov, V. S. Kuzmichev, A. Y. Tkachenko

Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov  
(National Research University)

Concept of construction of virtual lab for gas turbine engine testing is described. Virtual lab for gas turbine engine testing is one of components of gas turbine engine mathematical model and provides possibility for engine testing and determination of its performance parameters.

*Virtual lab, structure, algorithm, testing imitation, mathematical model.*

### **Информация об авторах**

**Рыбаков Виктор Николаевич**, аспирант кафедры теории двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [rybakov@ssau.ru](mailto:rybakov@ssau.ru). Область научных интересов: теория газотурбинных двигателей, виртуальные испытания ГТД, математическое моделирование, идентификация математических моделей ГТД.

**Кузьмичев Венедикт Степанович**, доктор технических наук, профессор кафедры теории двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [kuzm@ssau.ru](mailto:kuzm@ssau.ru). Область научных интересов: теория газотурбинных

двигателей, начальный уровень проектирования ГТД, оценка научно-технического уровня ГТД, САПР ГТД.

**Ткаченко Андрей Юрьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры теории двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [tau@ssau.ru](mailto:tau@ssau.ru). Область научных интересов: теория газотурбинных двигателей, математическое моделирование, управление газотурбинными двигателями, методы расчета эксплуатационных характеристик, численные методы оптимизации.

**Rybakov Viktor Nikolaevich**, post-graduate student at Aircraft Engine Theory Department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: [rybakov@ssau.ru](mailto:rybakov@ssau.ru). Area of research: gas turbine engines theory, virtual test of gas turbine engines, mathematical simulation, identification of mathematical model of gas turbine engines.

**Kuzmichev Venedikt Stepanovich**, Doctor of Science, Professor at Aircraft Engine Theory Department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: [kuzm@ssau.ru](mailto:kuzm@ssau.ru). Area of research: gas turbine engines theory, initial level of gas turbine engine design, assessment of scientific and technological level of gas turbine engines, gas turbine engines computer-aided systems.

**Tkachenko Andrey Yurievich**, Candidate of Science, Associate professor at Aircraft Engine Theory Department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: [tau@ssau.ru](mailto:tau@ssau.ru). Area of research: gas turbine engines theory, mathematical simulation, gas turbine engine controlling, design methods of field-performance data, numerical method of optimization.